

هیدروژئومورفولوژی، شماره ۳، تابستان ۱۳۹۴، صص ۲۰-۱
وصول مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۱۳ تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۴/۰۴/۱۶

تحلیل الگو و فرسایش‌پذیری مسیر رودخانه گرمی‌چای

صیاد اصغری سراسکانرود^۱

بتول زینالی^۲

نادر پورنریمان^۳

چکیده

رودخانه‌ها سیستم‌های پویا هستند که مرزهای جانبی و مشخصات مورفولوژیکی آنها در طول زمان و به‌طور پیوسته در حال تغییر است. این ناپایداری و تغییرات تحت تأثیر فرسایش‌پذیری مسیر رود و به‌تبع آن تغییر یافتن الگوهای رودخانه‌ای ایجاد می‌شود. محدوده مورد مطالعه این تحقیق رودخانه گرمی‌چای واقع در استان آذربایجان شرقی است. هدف این تحقیق بررسی انواع الگوهای جریان رودخانه و تعیین فرسایش‌پذیری مسیر جریان است. جهت رسیدن به این هدف از تصاویر ماهواره‌ای لندست، مدل رقومی ارتفاعی (DEM)، نقشه‌های زمین‌شناسی، کاربری اراضی و پوشش گیاهی و جهت تعیین الگوی رودخانه و عوامل مؤثر بر آن از شاخص‌های ضریب خمیدگی، زاویه مرکزی و تحلیل نیم‌رخ طولی استفاده شد. در مرحله بعد، با روی هم‌گذاری لایه‌های مؤثر در فرسایش‌پذیری رودخانه، کلاس‌های فرسایش‌پذیری رودخانه را در پنج کلاس تعیین گردید. نتایج تحقیق نشان داد که الگوی رودخانه پیچان‌رودی است. تحلیل نیم‌رخ طولی نشان داد که تغییر حالتی در پروفیل طولی دیده نمی‌شود و این تغییرات، حالت بهنجار دارد که گویای روند منظم و مشخص در عوامل تأثیرگذار بر فعالیت‌های مورفولوژیکی رودخانه است. علاوه بر این، نتایج نشان داد که مناطق فرسایش‌پذیری متوسط تا زیاد و زیاد، عمدتاً منطبق بر مناطقی که دارای تشکیلات حساس به فرسایش (عمدتاً رسوبات کواترنری)، فاقد پوشش گیاهی مناسب و متراکم هستند و باعث ایجاد حرکات دامنه‌ای به بستر رودخانه می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: فرسایش‌پذیری؛ الگوی رودخانه؛ نیم‌رخ طولی؛ گرمی‌چای

مقدمه

رودخانه‌ها سیستم‌های کاملاً پویا هستند و مرزهای جانبی و مشخصات مورفولوژیکی آنها در طول زمان و پیوسته در حال تغییراند. ناپایداری مجرا و سواحل رودخانه و رسوبات ناشی از آن نه تنها موجب تخریب اراضی حاشیه رودخانه و تأسیسات مجاور ساحل رودخانه می‌شود (کسلر و همکاران^۱، ۲۰۱۳: ۱). بلکه رسوبات حاصل از فرسایش در برخی مواقع میزان قابل توجهی از مجموع کل رسوباتی را شامل می‌شوند که جریان رود آن را حمل می‌کند. ناپایداری مجرا و سواحل رودخانه به دلیل تأثیرگذاری بر میزان فرسایش و خصوصیات مجاری رودخانه‌ها در توسعه پهنه سیلابی و مدیریت منابع آب اهمیت دارد (مینگوی و همکاران^۲، ۲۰۱۰: ۱). یکی از منابع اصلی رسوبات موجود در همه رودخانه‌های جهان، فرسایش سواحل رودخانه‌ها است (بلومنت و همکاران^۳، ۲۰۱۱؛ کسلر و همکاران، ۲۰۱۲؛ دی و همکاران^۴، ۲۰۱۳). در رودخانه‌هایی که هنوز به تعادل خود نرسیده‌اند، تعریض و تعمیق رودخانه و در رودخانه‌های پیچان‌دار عقب‌نشینی ساحل خارجی از پدیده‌های عادی به‌شمار می‌روند (تورون و همکاران^۵، ۱۹۸۱: ۴۷۱). شناسایی میزان فرسایش‌پذیری و تعیین الگوهای رودخانه‌ای موجب می‌شود که راهکارهای درست برای مقابله با رفتارهای کاتاستروفیک، بهره‌برداری صحیح‌تر و اقتصادی‌تر نسبت به گذشته و موفقیت طرح‌ها و سازه‌های اجرا شده تضمین گردد. پدیده‌هایی از قبیل فرسایش، رسوب‌گذاری و تغییرات رودخانه‌ای عکس‌العمل‌هایی است که رودخانه برای رسیدن به شرایط پایدار ایجاد می‌نماید و این عکس‌العمل‌ها ممکن است منجر به خسارات قابل توجهی گردد. از دلایل عمده ناپایداری سواحل و دیواره‌های رودخانه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: شسته شدن ذرات خاک در اثر جریان و امواج، شسته شدن پاشنه شیب کناره‌ها، ریزش و گسیختگی درونی آن، افزایش شیب کناره‌ها بر اثر فرسایش آب و آبستنگی، افزایش فشار آب منفذی در حالت کاملاً اشباع، گسیختگی درونی شیب به علت نشت آب به سمت رودخانه، فرسایش ناشی از ورود زه آب‌های کشاورزی و... (غفاری و همکاران، ۱۳۸۵: ۶۲ به نقل از رفاهی، ۱۳۷۵). از طرف دیگر پایداری رودخانه نیز تحت تأثیر مولفه‌های درونی و خارجی سیستم رودخانه‌ای است. مولفه‌های خارجی شامل متغیرهای اقلیم، پوشش گیاهی، فعالیت‌های انسانی و مکانیسم یخ زدن و ذوب شدن می‌باشد (افزلی مهر و دی ۲۰۰۹: ۲۳۶؛ برترند و پاپانیکولاو^۶، ۲۰۰۹: ۶۴۸۰) و مولفه‌های خارجی نیز شامل مورفولوژی رودخانه مانند انواع الگوهای رودخانه (مئاندری، شریانی و مستقیم) مشخصات هندسی و هیدرودینامیکی قوس‌های رودخانه‌ای، مواد بستر و کناره‌های رودخانه، متغیرهای هیدرولوژیکی جریان و

1- Kessler et al.

2- Minghui et al.

3- Belmont et al.

4- Day et al.

5- Thorne et al.

6- Bertrand & Papanicolaou

فاکتور تنش برشی است (مینگوی و همکاران ۲۰۱۰: ۳۹۱، توکالدنی و همکاران^۱، ۲۰۰۷: ۱۱۶۸ و ساسانی و همکاران، ۱۳۸۴: ۵۶۳). تغییر هر یک از مولفه‌های درونی و خارجی، پایداری رودخانه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. باید توجه داشت که یک رودخانه ممکن است در سازندی مقاوم نسبت به عمل فرسایش تشکیل شود. در این صورت موقعیت و ابعاد آن ثابت می‌ماند. از جانب دیگر رودخانه می‌تواند در مصالح آبرفتی فرسایشی پدیدار شود. در چنین حالتی یک تمایل همیشگی برای تغییر پیوسته موقعیت رودخانه از طریق فرسایش و تشکیل مجدد دیواره‌های ساحلی یا کناره‌ها به‌وضوح قابل مشاهده است (رضایی مقدم و همکاران الف، ۱۳۹۱: ۲).

احمدیان یزدی (۱۳۸۰) نقش پوشش گیاهی در حفاظت خاک و تثبیت کناره‌های رودخانه تجن -هریرود را مورد ارزیابی قرار داد؛ در این تحقیق با انجام دادن معادلات رگرسیونی بین میزان فرسایش کناری ناحیه و پوشش گیاهی متأثر از رطوبت خاک نتیجه گرفته شد که علاوه بر تراکم پوشش گیاهی، پهنای ناحیه پوشش گیاهی در مسیر رودخانه نقش موثری در کنترل فرسایش کناری دارد. نوحه‌گر و همکاران (۱۳۸۲) وضعیت ژئومورفولوژیکی پیچان رود و نقش آن را در فرسایش بستر و کناره‌های رودخانه میناب بررسی کرده‌اند. نتایج این تحقیق نشان داد که هرگونه تغییری در مصالح کف و کناره‌های رودخانه میناب می‌تواند سبب ایجاد تغییراتی در ویژگی‌های مارپیچ پایین دست شود و آنها را از حالت منظم و تحت کنترل خارج و به یک معضل بسیار شدید محیطی تبدیل سازد. غفاری و همکاران (۱۳۸۵) تغییرات مورفولوژی کناره آبراه بابلرود را بررسی کرده‌اند. نتایج این تحقیق نشان داد که مقدار تنش برشی در دیواره‌ها کمتر از کانال اصلی بوده و در سمت خارجی پیچ‌ها و نواحی مئاندری رودخانه مقدار تنش افزایش می‌یابد و میزان فرسایش کناری بالا می‌رود. کرمی (۱۳۸۶) عوامل مؤثر بر فرسایش کناره‌های رودخانه سعیدآباد چای را مورد مطالعه قرار داد. نتیجه این تحقیق نشان داد که ۴۷/۳ درصد مناطق واقع در حاشیه رودخانه در معرض خطر متوسط تا بسیار شدید فرسایش کناره‌ای و ۵۲/۷ درصد در پهنه‌های با خطر کم تا بسیار کم قرار دارند. رضایی مقدم و همکاران (۱۳۹۱) مناطق حساس به فرسایش رودخانه‌ای را در بخشی از رودخانه آجی‌چای بررسی کردند. در این تحقیق مناطق کناری در خطر فرسایش، در سه بخش آسیب‌پذیر، بحرانی و بسیار بحرانی تعیین شد.

ولمن^۲ (۱۹۶۷) نشان داد که افزایش جریان رودخانه مانند سیلاب منجر به افزایش فرسایش کناری رودخانه می‌شود هم‌چنین افزایش بار رسوبی رودخانه و تبادل رسوب بین مجرا و ساحل رودخانه باعث افزایش فرسایش و هم‌چنین تعریض مجرای رودخانه می‌گردد. نتایج تحقیقات داربی و تورن^۳ (۱۹۹۶) نشان داد که

1- Tokaldany et al.

2- Wolman

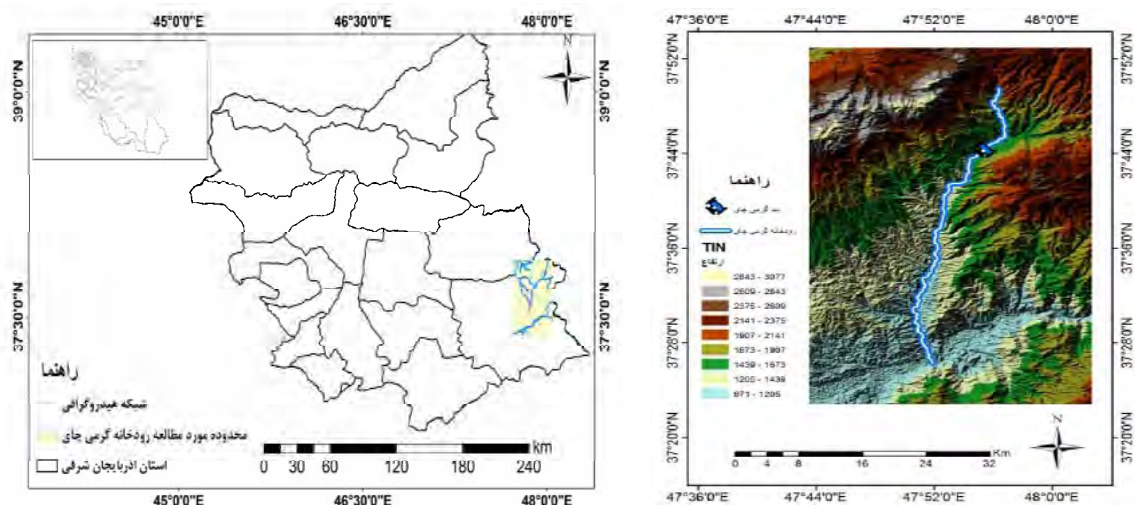
3- Tiron

رودخانه‌های نواحی آبرفتی به‌ندرت حالت پایدار دارند و ویژگی عمده این رودخانه‌ها فرسایش شدید کناری است و علت مقاومت آن بسیار پایین تشکیلات سواحل رودخانه است. تیرون (۲۰۰۹) فرایندهای رسوب‌گذاری و فرسایش را در پیچان‌رودهای دلتای دانوب بررسی کرد. نتیجه این تحقیق نشان داد که فرایندهای رسوب‌گذاری و فرسایش در پیچان‌رودها تحت تأثیر معیارهای مختلفی است و با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناختی و رسوبی مناطق مختلف متغیر است. کسلر و همکاران (۲۰۱۳) فرسایش کناری رودخانه مینوسوتا را در بازه‌های زمانی مختلف توسط ابزارهای سنجش از دور و روش‌های ریاضی و مطالعات صحرایی تعیین کردند. نتیجه کار این محققان نشان داد که هر یک از ابزارهای فوق نتایج متفاوتی از میزان فرسایش کناری در رودخانه را نشان می‌دهد.

این تحقیق در پی آن است که اولاً با تقسیم‌بندی مسیر رودخانه به بازه‌های یکسان از نظر فرایندهای مورفولوژیکی الگوی رودخانه را در بازه‌های مختلف تعیین کند و سپس با استفاده از تحلیل نیمرخ طولی رودخانه عوامل مؤثر بر الگوهای جریان را بررسی کند و با در نظر گرفتن عوامل مؤثر در فرسایش رودخانه‌ای، شدت و کلاس‌های فرسایشی رودخانه را تعیین کند. و در نهایت رابطه بین فرسایش‌پذیری رودخانه و اثر آن بر الگوهای رودخانه‌ای را بررسی و تحلیل کند.

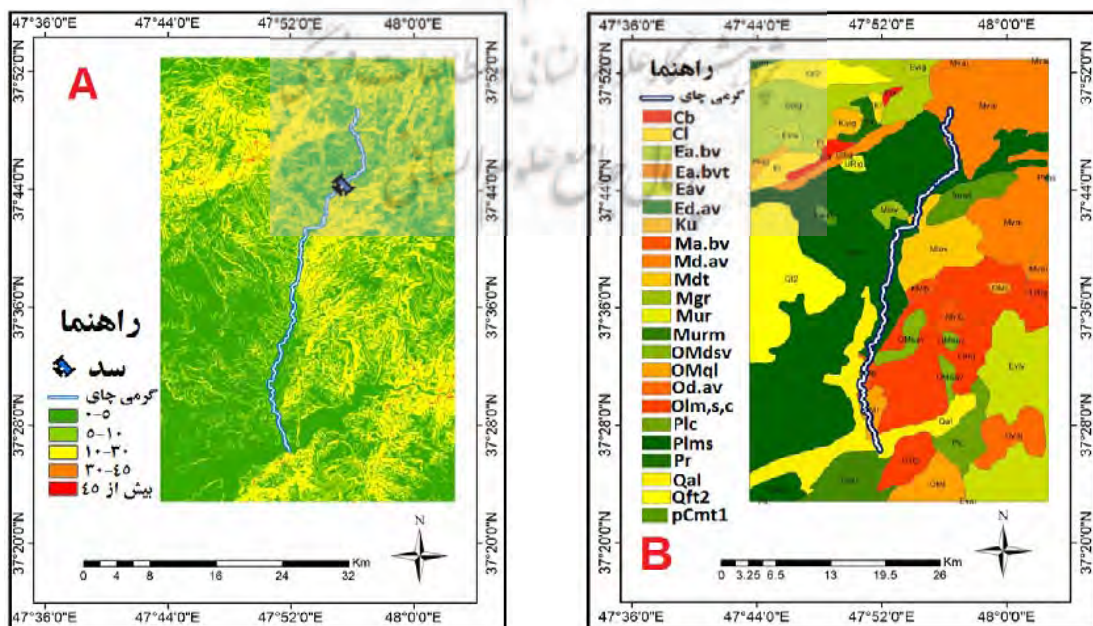
منطقه مورد مطالعه

رودخانه گرمی‌چای با ۳۰۰ میلیون مترمکعب آب‌دهی سالانه، از کله‌گاه سرچشمه گرفته، به قزل‌اوزن ملحق می‌شود. بر روی این رودخانه سد گرمی‌چای تأسیس شده که تأمین‌کننده آب آشامیدنی و کشاورزی شهرستان میانه است. حوضه واحد هیدرولوژیک گرمی‌چای در مختصات جغرافیایی $56^{\circ} 26'$ تا $47^{\circ} 47'$ ، $48^{\circ} 48'$ تا $37^{\circ} 22'$ طول شرقی و $45^{\circ} 45'$ تا $37^{\circ} 48'$ عرض شمالی و در جنوب شرقی استان آذربایجان شرقی قرار گرفته است. طول رودخانه گرمی‌چای ۵۵ کیلومتر است و ارتفاع آن در مبداء ۲۵۰۶ متر از سطح دریا برآورد شده است. مساحت این حوضه $61622/1$ هکتار است و $1/34$ درصد از مساحت استان آذربایجان شرقی را به‌خود اختصاص داده است. دو ایستگاه هیدرومتری ساری‌قمیش و چیتاب در حوضه احداث شده است. الگوی حوضه طرح شبکه آبراه‌های مربع مستطیلی و تراکم شبکه آبراه‌های در این واحد هیدرولوژیک $0/36$ کیلومتر در کیلومتر مربع است (شکل ۱).

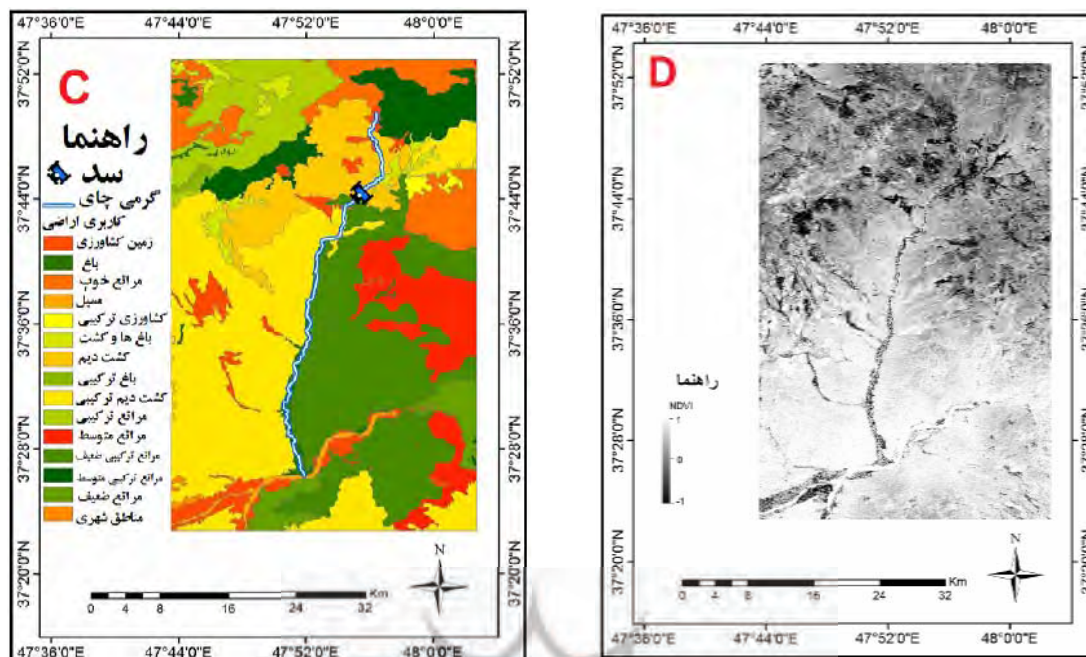


شکل (۱) نقشه موقعیت جغرافیایی رودخانه گرمی چای

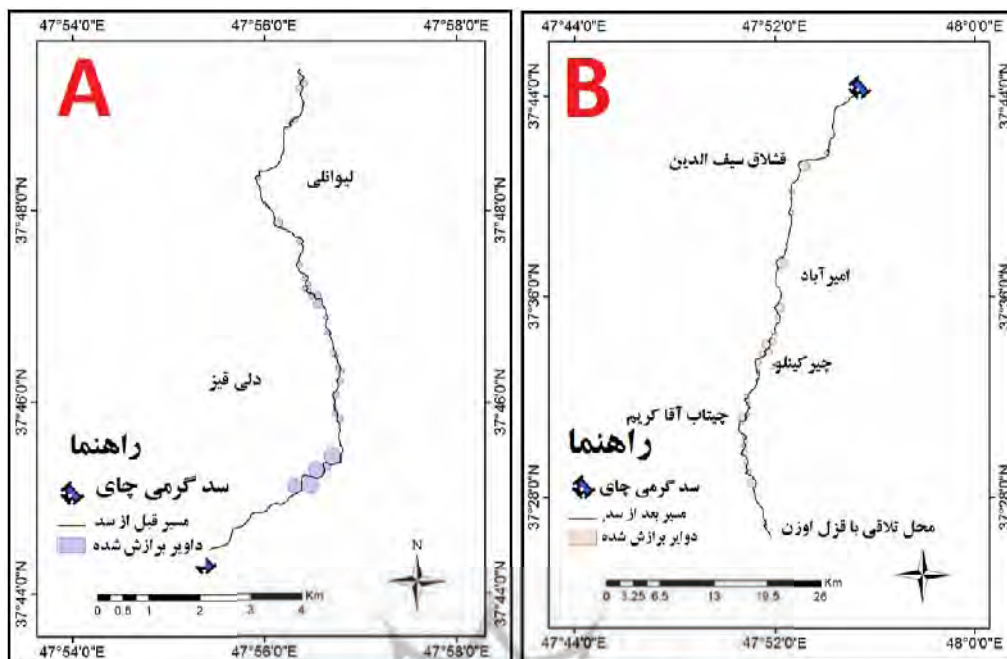
سازندهای زمین‌شناسی در حوضه رودخانه گرمی چای با توجه به نقشه زمین‌شناسی (شکل ۲A) شامل میوسن، با ۲۶ درصد و رسوبات کواترنری ۵۳ درصد و بقیه سنگ‌های آذرین و دگرگونی می‌باشد. گسترش سازندهای کواترنری در مسیر رودخانه که عمدتاً به صورت پادگانه‌های آبرفتی در حاشیه رودخانه وجود دارند، باعث شده است که قدرت فرسایش‌پذیری رودخانه به علت سست بودن این رسوبات بسیار زیاد شود. بنابراین حجم دبی رسوبی رودخانه زیاد بوده و هم‌چنین بار معلق رودخانه زیاد است. به همین دلیل رودخانه در بیشتر ایام سال گل‌آلود است. لیتولوژی این حوضه عمدتاً از رسوبات ولکانیکی، ماسه‌سنگ، کنگلومرا و تراس‌های آبرفتی و جوان تشکیل می‌شود.



شکل (۲) A: نقشه شیب به درصد B: نقشه زمین‌شناسی C: نقشه کاربری اراضی D: شاخص NDVI منطقه مورد مطالعه



در این مطالعه، به لحاظ مورفولوژی متفاوت رودخانه در بخش‌های مختلف، مسیر مورد مطالعه به دو بخش تقسیم شده است، در تقسیم بازه‌ها سعی شده که در تمام طول مسیر هر بخش با توجه به نقشه‌های توپوگرافی، نقشه زمین‌شناسی و تصاویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه از نظر فرایندهای مورفولوژیکی دارای تجانس نسبی باشد. بر همین اساس، رودخانه به دو بازه قبل از سد و بعد از سد طبقه‌بندی شده است. بازه قبل از سد محدوده بالاتر از روستای لیوانلی تا محل سد گرمی‌چای را شامل می‌شود. قسمت اعظم این بخش در داخل محدوده کوهستانی قرار دارد و عرض رودخانه به دلیل کوهستانی بودن و مقاومت تشکیلات زمین‌شناسی کم است، در این بخش در قسمت اعظم مسیر، رودخانه فقط یک مجرا دارد و از دره‌ای باریک عبور می‌کند (شکل ۳، A). بخش بعد از سد محدوده، بین بعد از سد گرمی‌چای تا محل تلاقی گرمی‌چای با رودخانه قزل‌اوزن را شامل می‌شود. در این بخش عرض رودخانه به دلیل کاهش ارتفاعات بیشتر می‌شود و در بخش‌هایی از مسیر مورد مطالعه، الگوی سیستم جریان، رودخانه به صورت شریانی دیده می‌شود. شستشوی زیاد و همگن در محدوده رسوب‌های کواترنری باعث مستقیم‌تر شدن مسیر و افزایش سرعت جریان و تبدیل رودخانه از حالت مئاندری-شریانی به شریانی (رودخانه با جزایر متحرک) و سپس آناستوموزینگ (رودخانه با جزایر دائمی و پوشیده از علف و درختچه) شده و در نهایت باعث باز شدن قوس‌ها در این بخش شده است (شکل ۳، B).



شکل (۳) - A: مسیربازه قبل از سد همراه با دواير برازش شده بر پيچان‌ها B: مسیر بازه بعد از سد همراه با دواير برازش داده شده

مواد و روش

برای انجام این تحقیق از تصاویر ماهواره‌ای لندست، سنجنده ETM+ سال ۲۰۰۰، نقشه‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی، کاربری اراضی و نقشه پوشش گیاهی مستخرج از شاخص NDVI استفاده شده است. در این مقاله برای بررسی الگوی رودخانه و فرسایش‌پذیری مسیر رودخانه روش کار تحقیق به صورت طبقه‌بندی شده به شرح ذیل ارائه می‌شود.

استخراج مسیر رودخانه

جهت آماده‌سازی تصاویر برای تعبیر و تفسیر و کاهش خطاها، عملیات پیش پردازش بر روی تصاویر انجام گرفت. پیش پردازش‌های اعمال شده شامل تصحیحات رادیومتریک، هندسی و ژئورفرنس نمودن تصاویر است. برای استخراج مسیر رودخانه از تصاویر سنجنده ETM+ از تکنیک‌های ترکیب رنگی تصاویر (RBG: باندهای ۲-۴-۷) استفاده شد.

استخراج نقشه پوشش گیاهی

جهت استخراج نقشه پوشش گیاهی از شاخص NDVI بهره‌گیری شد. شایان ذکر است که این شاخص یکی از کاربردی‌ترین شاخص‌ها در جهان است و در حد بسیار وسیع در مسایل مختلف به کار می‌رود. شاخص NDVI نسبت به تغییر مقدار بیومس، مقدار کلروفیل و تنش در مقدار آب تاج پوشش واکنش نشان می‌دهد. شاخص

NDVI اساساً بر پایه رفتارهای مختلف نمایش داده شده به‌وسیله اختلاف در طول موج‌های الکترومغناطیس گسیل شده از گیاهان است.

محاسبه شاخص NDVI براساس رابطه (۱) صورت گرفت:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در این رابطه NIR تشعشع ثبت شده در باند مادون‌قرمز نزدیک و Red تشعشع ثبت شده در باند مادون‌قرمز و دامنه تغییرات این شاخص بین ۱ و -۱ است (رسولی، ۱۳۸۷: ۲۷۵)، نتیجه این شاخص در شکل (۲) آمده است.

– بررسی کمی شکل رودخانه

در مطالعه و بررسی رودخانه‌ها، برای کمی کردن رفتار رودخانه‌ها، تعیین الگو و تغییرات آن در طول زمان، باید مشخصات و معیارهای هندسی رودخانه استخراج و محاسبه گردد. برای بررسی پلان رودخانه، عملیات زیر صورت گرفت:

۱- ترسیم خط مرکزی رودخانه^۱: نقشه محور رودخانه از روی تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی تهیه کردیم، در تهیه نقشه مذکور ضمن اعمال دقت زیاد سعی گردید که نقاط وسط رودخانه در جهت طولی به هم متصل شوند. چون امکان رسم خط‌القدر رودخانه ممکن نبود، در این مورد با توصیه محققانی از جمله بریس (۱۹۸۲)، فرگوسن (۱۹۷۳) و هوک (۱۹۸۳) برای بررسی پلان رودخانه خط مرکزی رودخانه مورد توجه قرار گرفت (اصغری، ۱۳۹۱: ۴۵).

۲- برازش قوس‌های مماس بر پیچ‌های رودخانه: در عملیات مزبور سعی شد که، دوایر مماس شده بیشترین و بهترین تطابق را با قوس داشته باشند بدین منظور تعداد ۴۵ پیچان رود برای بخش قبل از سد و ۳۹ پیچان-رود برای بخش بعد از سد شناسایی گردید.

۳- اندازه‌گیری طول موج یا طول پیچان‌رود^۲ و طول دره: طول موج و طول دره رودخانه، دو معیار اصلی در طبقه‌بندی رودخانه و تعیین ضریب خمیدگی است. معمولاً بین این دو معیار همبستگی زیادی وجود دارد. روی نقشه محور رودخانه، ابتدا نقاط عطف یا نقاط تغییر انحنای محور رودخانه با دقت زیاد مشخص شد و هر دو نقطه عطف مربوط به یک قوس به یکدیگر متصل شد و طول پاره خط حاصله (وتر مقابل به قوس محور رودخانه) با دقت اندازه‌گیری گردید. این طول معادل نصف طول موج ($\frac{\lambda}{2}$) هر قوس رودخانه است. برای به

1- Center line

2- Meander Length or Wave Length

دست آوردن طول دره نیز نقطه عطف یک قوس تا نقطه عطف قوس بعدی در روی مسیر محور رودخانه مشخص شد و با استفاده از نرم‌افزار برای هر قوس طول دره محاسبه گردید.

۴- اندازه‌گیری شعاع قوس‌های پیچان‌رود

۵- محاسبه زاویه مرکزی^۱ قوس‌ها: زاویه مرکزی قوس‌های زده شده بر روی هر کدام از بازه‌ها با استفاده از

$$A = \frac{180L}{R\pi} \quad \text{رابطه (۲)} \quad \text{محاسبه شد:}$$

در این رابطه A زاویه مرکزی، R شعاع دایره برازش داده شده است.

۶- محاسبه ضریب سینوزیته^۱: با استفاده از رابطه (۳) اندازه ضریب خمیدگی برای هر قوس محاسبه شد.

$$S = \frac{L}{\lambda/2} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در این رابطه S ضریب خمیدگی، L طول قوس، $\lambda/2$ نصف طول موج است.

- تحلیل نیمرخ طولی

با توجه به این که متغیرهای زیادی در شکل و تکامل نیمرخ طولی موثر هستند (مانند تغییرات دبی، ابعاد بار بستر، مقاومت لیتولوژیکی بستر، ورود شاخه‌های فرعی و حرکات تکتونیکی، تغییرات نیروهای رودخانه‌ای) و با تغییر هر یک از این متغیرها شکل و الگوی نیمرخ طولی نیز تغییر خواهد کرد (روستایی و نیری، ۱۳۹۰؛ بیاتی خطیبی و حیدرزادگان، ۱۳۸۴) به همین دلیل جهت بررسی عوامل موثر بر الگوی رودخانه نیمرخ طولی رودخانه با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) تهیه شده و با توابع نرم‌افزار ARC Map ترسیم گردید. شیب رودخانه نیز در هر دو بخش با روش درون‌یابی از طریق رابطه (۴) محاسبه شد.

$$S = \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad \text{رابطه (۴)}$$

در این رابطه، Δh اختلاف ارتفاع و Δl مسافت بین دو نقطه.

- تحلیل فرسایش‌پذیری مسیر رودخانه

جهت محاسبه فرسایش‌پذیری رودخانه لایه‌های زمین‌شناسی (شکل ۲ A)، شیب (شکل ۲ B)، پوشش گیاهی (شکل ۲ D)، کاربری اراضی (شکل ۲ C)، نقشه لیتولوژی، نقشه مسیر رودخانه و نقشه آبراهه‌ها در نرم‌افزار Arc GIS تهیه شد. مراحل کار بدین صورت است که ابتدا نقشه رقومی زمین‌شناسی در سیستم GIS وارد شد. سپس نقشه شیب در ۵ کلاس ۰-۵، ۵-۱۰، ۱۰-۳۰، ۳۰-۴۵ و بیشتر از ۴۵ درصد تهیه گردید. سپس

1- Central Angle

این دو نقشه با نقشه پوشش گیاهی و نقشه آبراهه‌های منطقه مورد مطالعه هم‌پوشانی گردید. در مرحله بعد براساس خصوصیات کانی‌شناسی و یا نهشته‌ای هر واحد سنگی (طبقه‌بندی سنگ‌ها براساس درجه سختی آنها) (فیض‌نیا، ۱۳۷۴) تعیین شد و سپس فرسایش‌پذیری واحدهای سنگی براساس جدول (۱) در پنج کلاس کیفی، کم، کم تا متوسط، متوسط، متوسط تا زیاد، و زیاد با رعایت اولویت به ترتیب لیتولوژی، شیب منطقه، میزان و نوع پوشش گیاهی در هر کلاس طبقه‌بندی شد. به‌عنوان مثال، گرانیته به‌عنوان سنگی با فرسایش‌پذیری کم و مارن در شیب بالای ۳۰ درصد به‌عنوان کلاس فرسایش‌پذیر زیاد قرار گرفت و در صورت وجود پوشش گیاهی متراکم و جنگلی، یک کلاس فرسایش طبقه پایین در نظر گرفته شد (میزان فرسایش‌پذیری کم به‌دلیل پوشش گیاهی متراکم). بقیه واحدهای سنگی نیز با توجه به شیب و پوشش گیاهی به‌طریق گفته شده طبقه‌بندی شد. در نهایت بر حسب درصد طول مسیر رودخانه و میزان تراکم هیدرولوژیکی رودخانه و میزان گسترش هر سازند در هر طبقه میزان فرسایش‌پذیری تعیین گردید. در مرحله بعد برای تعیین میزان فرسایش کل رودخانه برای هر یک از مقادیر کیفی با توجه به جدول (۱) امتیاز یک تا پنج داده شد. هر یک از اعداد به عدد مربوط در هر دسته ضرب می‌شود و عدد حاصل، امتیاز فرسایش رودخانه را تعیین می‌کند. در آخرین مرحله تحقیق، با بررسی نتایج حاصل از انجام بازدیدهای میدانی و مقایسه نتایج مدل‌ها و روش‌های کمی استفاده شده در تحقیق، نتیجه‌گیری نهایی ارائه شد.

جدول (۱) نحوه امتیازدهی مقادیر کیفی

مقادیر کیفی فرسایش‌پذیری	کم	کم تا متوسط	متوسط	متوسط تا زیاد	زیاد
امتیاز	۱	۲	۳	۴	۵

بحث و نتایج

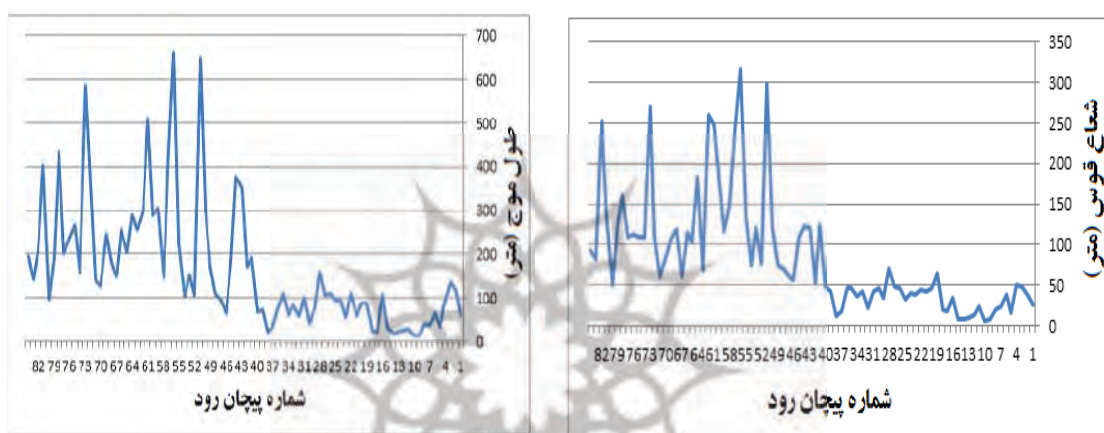
– اندازه‌گیری طول موج و شعاع حلقه‌های پیچان رودی

مقدار میانگین حسابی و انحراف معیار آن برای هر دو بخش محاسبه شد و نتیجه آن در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول (۲) مقادیر میانگین حسابی و انحراف معیار طول پیچان رود گرمی چای به تفکیک بازه‌ها

طول موج	بازه قبل از سد	بازه بعد از سد	شعاع قوس‌ها	بازه قبل از سد	بازه بعد از سد
میانگین	۸۷/۷	۲۵۵/۹	میانگین	۴۱/۴	۱۳۳/۶
حداکثر	۳۷۸	۶۶۲	حداکثر	۱۲۶	۳۱۶
حداقل	۱۳	۶۴	حداقل	۶/۵	۵۰
انحراف معیار	۷۵/۸	۱۵۱/۶	انحراف معیار	۲۹/۲	۷۲/۲

با توجه به اطلاعات ارائه شده در جدول (۲) ملاحظه می‌شود که متوسط طول موج و شعاع حلقه‌ها در بخش بعد از سد بسیار بیشتر از بخش قبل از سد است و بین این دو بخش اختلاف چشمگیری دارند. بالا بودن اندازه طول موج و شعاع حلقه‌ها در بازه بعد از سد، به علت فرسایش‌پذیری و قدرت جابه‌جایی بالای رودخانه در بخش سوم است چون بخش بعد از سد در دشت واقع شده است، بنابراین رودخانه می‌تواند زیاد جابه‌جا شود. وجود فضای کافی برای جابه‌جایی رودخانه و همچنین گسترش سازندهای فرسایش‌پذیر مخصوصاً سازندهای کواترنری هم‌چون پادگانه‌های آبرفتی و فرسایش‌پذیر بودن آنها، باعث افزایش طول موج رودخانه می‌شود (اشکال ۵ و ۶).



شکل (۶) تغییرات شعاع قوس‌های پیچان رودها گرمی‌چای (بازه قبل از سد از شماره ۱ تا ۴۵ و بازه بعد از سد از ۴۶ تا ۸۴)

شکل (۵) تغییرات طول موج پیچان رودها در گرمی‌چای

بررسی پیچان‌ها با استفاده از شاخص ضریب خمیدگی

براساس جدول (۳) در بخش قبل از سد میانگین ضریب خمیدگی $1/79$ به‌دست آمد و بنابراین می‌توان گفت که ۸۴ درصد این بخش خمیدگی زیادی دارد، خمیدگی کم در این بخش دیده نشد، خمیدگی خیلی زیاد، ۱۳ درصد قوس‌ها را تشکیل می‌دهد و خمیدگی کمتر از $1/2$ نیز در ۲ درصد بخش دیده می‌شود. بنابراین الگوی این بازه خمیدگی زیادی دارد، که از ویژگی‌های رودخانه‌های مئاندری است. در بخش بعد از سد، میانگین ضریب خمیدگی $1/83$ به‌دست آمد، ۹۷ درصد این بخش خمیدگی زیاد دارد، خمیدگی کم و خمیدگی خیلی زیاد در این بخش مشاهده نشد و خمیدگی کم نیز $2/5$ درصد این بخش را تشکیل می‌دهد و خمیدگی کمتر از $1/2$ در آن نیز دیده نمی‌شود. الگوی این بخش نیز الگوی مئاندری است و شاخص ضریب خمیدگی نیز در این بازه این الگو را نشان می‌دهد. این بخش به‌دلیل داشتن تشکیلات فرسایش‌پذیر و شیب کم تغییرات زیادی را در مسیر مجرا می‌پذیرد و به علت دارا بودن مواد سیلابی اغلب تحت اشغال کشاورزان قرار می‌گیرد.

جدول (۳) مشخصه های مقادیر ضریب خمیدگی رودخانه گرمی چای

مسیر مطالعاتی	۱/۲ <	۱/۴ تا ۱/۲	۲ تا ۱/۵	۲ تا ۱/۸	میانگین حداکثر حداقل انحراف معیار الگوی مجرا
الگوی مجرا	مستقیم	خمیدگی کم	خمیدگی زیاد	خمیدگی خیلی زیاد	
بازه قبل از سد	۰/۲۲	۰	٪۸۴/۴	٪۱۳/۴	پیچان رودی ۰/۱۹
بازه بعد از سد	۰	٪۲/۵۶	٪۹۷/۴۴	۰	پیچان رودی ۰/۱۴

بررسی شکل بازه‌ها با استفاده از شاخص زاویه مرکزی

براساس جدول (۴) در بخش قبل از سد ۳۳/۳ درصد قوس‌ها مربوط به الگوی پیچان‌رودی توسعه‌نیافته و ۶۲/۲ درصد آن مربوط به قوس‌های الگوی پیچان‌رودی توسعه‌یافته است و الگوی پیچان‌رودی زیاد توسعه‌یافته نیز ۴/۵ درصد این بخش را تشکیل می‌دهد و کمترین فراوانی مربوط به الگوی جریان شبه پیچان‌رود است و این در حالی است که الگوی نعل اسبی در این بخش دیده نمی‌شود. بنابراین، میزان توسعه پیچان‌رودی در این بخش به شکل پیچان‌رود توسعه یافته و یا در حال توسعه می‌باشد.

جدول (۴) مشخصه‌های مقادیر زاویه مرکزی و میزان توسعه پیچان‌رودهای رودخانه گرمی چای

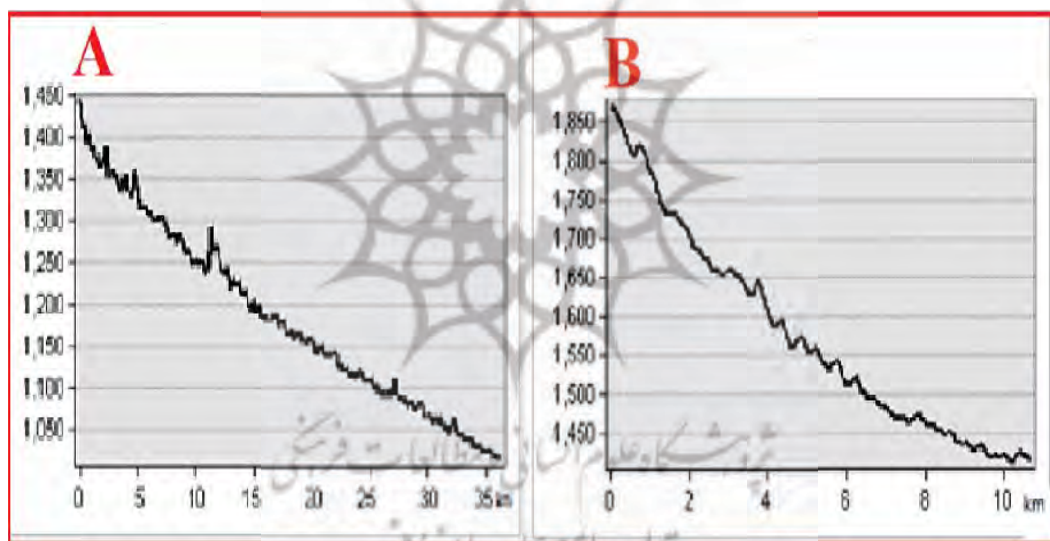
شبه پیچان‌رود	پیچان‌رود توسعه نیافته	پیچان‌رود توسعه یافته	پیچان‌رود زیاد توسعه یافته	نعل اسبی	میانگین حداکثر حداقل انحراف معیار	شکل بازه
زاویه مرکزی > ۴۱	۸۵-۴۱	۱۵۸-۸۵	۱۵۸-۲۹۶	< ۲۹۶		
قبل از سد	٪۳۳/۳	٪۶۲/۲	٪۴/۵	۰	۱۰۲/۵	پیچان‌رودی ۲۸/۸
بازه بعد از سد	٪۳۵/۸۹	٪۵۶/۴۱	٪۷/۶۹	۰	۱۰۴/۸	پیچان‌رود توسعه یافته ۳۳/۵

در بخش بعد از سد ۳۵/۸ درصد قوس‌ها مربوط به الگوی پیچان‌رودی توسعه‌نیافته و ۵۶/۴ درصد قوس‌های این بخش نیز الگوی پیچان‌رودی توسعه‌یافته را دارد و الگوی پیچان‌رودی زیاد توسعه‌یافته نیز ۷/۶ درصد این بخش را تشکیل می‌دهد. الگوی شبه پیچان‌رود و نعل اسبی در این بخش دیده نمی‌شود. بنابراین میزان توسعه پیچان‌رودی در این بخش به شکل پیچان‌رود توسعه یافته و یا توسعه‌نیافته می‌باشد.

بررسی پروفیل طولی رودخانه

برای بررسی پروفیل طولی بستر رودخانه از مدل رقومی ارتفاع (DEM) استفاده شده است. بررسی نیم‌خ طولی رودخانه در هر دو بخش نشان می‌دهد که رودخانه تقریباً دارای لیمرخ مقعر است و شیب از بالادست به طرف پایین دست کاهش می‌یابد (شکل ۷ A و B). پروفیل کاوگونه، حالت ویژه رودخانه‌هایی است که نیروهای بازدارنده آنها به حالت تعادل رسیده است (مقصودی و همکاران، ۱۳۸۹). تغییر حالتی در پروفیل طولی دو بخش دیده نمی‌شود و این تغییرات حالت بهنجار دارد و گویای روند منظم و مشخص در عوامل تأثیرگذار در فعالیت‌های مورفولوژیکی رودخانه است. با توجه به نقشه زمین‌شناسی و گسترش سازندهای با

مقاومت فرسایشی تقریباً یکسان در هر دو بخش باعث ایجاد شکل بهنجار در نیمرخ طولی رودخانه شده است. البته در هر دو نیمرخ طولی عدم یکنواختی دیده می‌شود؛ محققان عدم یکنواختی پروفیل طولی را به تغییرات ناشی از لیتولوژیکی نسبت داده‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که حتی وقتی رودخانه در بستر آبرفتی جاری باشد، چنین عدم برابری به وجود می‌آید که به وسیله مناطق کم عمق با جریان سریع و عمیق با جریان آرام‌تر مشخص می‌شوند (روستایی و نیری به نقل از آلن کلاو و پیتز کامفورت، ۱۹۸۷). با توجه به این که تغییرات شیب طولی رودخانه از فعالیت‌ها و جابه‌جایی‌های تکتونیکی ناشی می‌شود (مددی و همکاران، ۱۳۸۳)، لذا به تغییرات شیب حساس است و از عدم عملکرد گسل‌ها به‌طور مستقیم در هر دو بخش حکایت می‌کند چون گرادیان شیب رودخانه در هیچ قسمتی تغییر نرمال نداشته و با شیب ملایم به طرف پایین دست جریان دارد. شیب‌های به دست آمده در بخش قبل از سد و بعد از سد به ترتیب ۰.۴۵۶% و ۰.۱۳۱% می‌باشد که روند نزولی و نزدیک به هم را دارد و حالت تقریباً نرمال و عادی را در طی مسیر نشان می‌دهد.



شکل (۷) A: نیمرخ طولی رودخانه در بازه قبل از سد B: نیمرخ طولی رودخانه در بازه بعد از سد

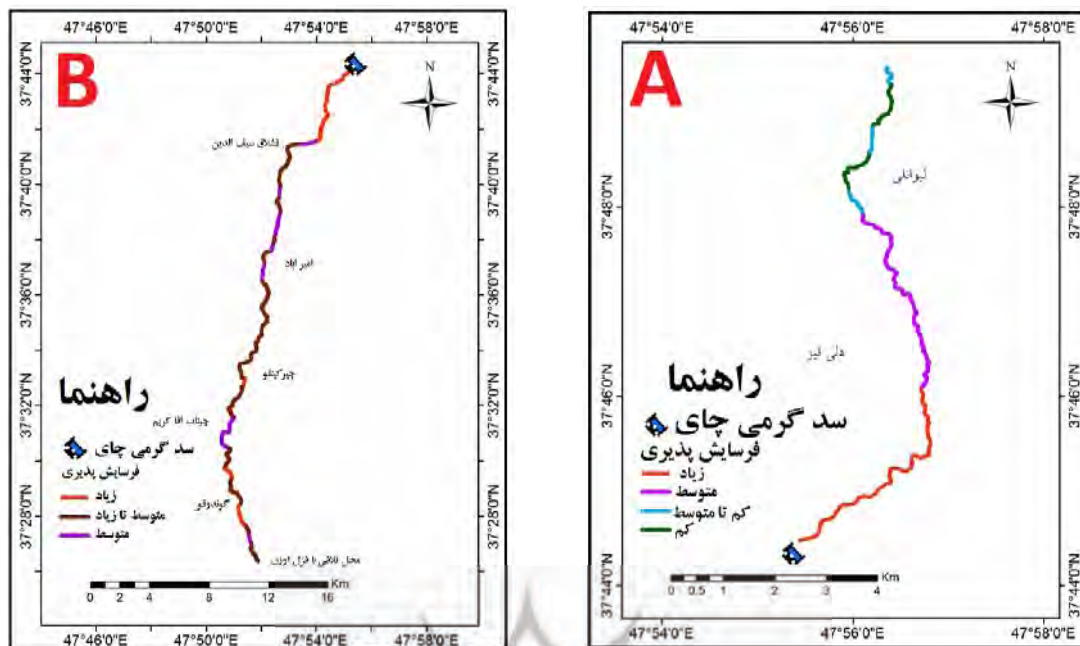
تعیین مناطق فرسایش پذیری بازه‌های مورد مطالعه در رودخانه گرمی‌چای

عمل فرسایش رودخانه به دو صورت کلی فرسایش قائم و فرسایش جانبی رخ می‌دهد. در ابتدا فرسایش قائم رودخانه زیاد است. هم‌چنین در این قسمت ظرفیت حمل رسوب آن بیش از مقدار موادی است که در اختیارش قرار می‌گیرد. به تدریج بار رسوبی رودخانه افزایش می‌یابد تا جایی که مقدار موادی که دریافت و حمل می‌کند، در حد ظرفیت آن خواهد بود، در این حالت دوره فرسایش قائم و سریع رودخانه به پایان می‌رسد و فرسایش آن بیشتر از نوع جانبی می‌شود. نیمرخ طولی رودخانه در چنین وضعیتی در حال تعادل بوده که شیب آن از

بالا به پایین کاهش می‌یابد. به نحوی که در نزدیکی دهانه به سطح افقی مماس می‌شود (حافظی مقدس و همکاران به نقل از پترسون، ۱۹۸۶). چنین مکانیسمی در مطالعات صحرایی و در بررسی نیمرخ طولی رودخانه گرمی‌چای به‌وضوح قابل مشاهده است. فرسایش توده‌ای در قسمت‌های مختلف ساحل رودخانه موجب عریض شدن سریع آبراهه و ورود آب‌های زیاد به درون آن می‌شود.

در اشکال (A و B) مناطق فرسایش‌پذیر گرمی‌چای در ۵ کلاس کم، کم تا متوسط، متوسط، متوسط تا زیاد و زیاد مشخص گردید. مناطق فرسایش‌پذیر متوسط تا زیاد و زیاد عمدتاً منطبق بر مناطقی هستند که دارای تشکیلات حساس به فرسایش (عمدتاً رسوب‌های کواترنری)، فاقد پوشش گیاهی مناسب و متراکم، مناطق منطبق بر تصرف حریم بستر رودخانه و ساخت و ساز (عمدتاً سدسازی) و توسعه اراضی کشاورزی در حاشیه رودخانه‌ها و شیب تند دیواره‌های مشرف به رودخانه هستند که باعث ایجاد حرکات دامنه‌ای (ریزش و لغزش) به بستر رودخانه می‌شوند. باید توجه داشت که استراتژی‌های مدیریتی در بستر و حوضه رودخانه‌ها نیز ممکن است باعث افزایش فرسایش در سواحل رودخانه‌ها شود (کومیتی و همکاران، ۲۰۱۱). عملیات سدسازی نیز به همین نحو عمل می‌کند. با توجه به اشکال (A و B) میزان فرسایش‌پذیری در اطراف سد گرمی‌چای علاوه بر عوامل ذکر شده در فرسایش‌پذیری مناطق مختلف گرمی‌چای، عملیات سد سازی نیز متأثر است که باعث ناپایدار شدن سواحل و کناره‌های رودخانه شده است و در بیشتر نقاط مشرف به سد گرمی‌چای فرسایش توده‌ای دیده می‌شود. فرسایش توده‌ای، موجب عریض شدن سریع بستر رودخانه گشته، مواد رسوبی را برای حمل رودخانه آماده می‌کند. حمل مواد رسوبی باعث ایجاد الگوهای خاص در رودخانه می‌شود، بنابراین با توجه به ویژگی‌های خاص ژئومورفیک رودخانه گرمی‌چای، فرسایش کناری و ایجاد انواع الگوهای رودخانه‌ای (پیچان‌رودی، شریانی و آناستوموزینگ) به‌صورت مستمر در جای جای رودخانه در حال وقوع است. باید توجه داشت که ایجاد الگوهای متفاوت رودخانه در گرمی‌چای در نواحی دشتی تحت تأثیر فرایندهای تدارک دبی، و دبی رسوبی تحت تأثیر فرسایش کناری است. در حالی که در نواحی کوهستانی الگوهای رودخانه عمدتاً تحت تأثیر فاکتورهای زمین‌شناسی است و به‌علت مقاومت تشکیلات زمین‌شناسی فرسایش کناری بسیار محدود است.

بدیهی است که مناطق مشخص شده در بخش‌های مورد مطالعه به‌عنوان مناطق فرسایش‌پذیر می‌تواند جهت شناسایی مناطق الویت دار برای حفاظت مورد بررسی قرار گیرد.



شکل (۸) A: نقشه مناطق فرسایش پذیری بازه قبل از سد B: نقشه مناطق فرسایش پذیری بازه بعد از سد

تعیین درصد طول آبراهه تحت تأثیر فرسایش و میزان فرسایش کل رودخانه

با اولویت قرار دادن نقش عوامل مؤثر بر فرسایش بر اساس روش تشریح شده در قسمت مواد و روش‌ها، میزان فرسایش‌پذیری رودخانه تعیین شد. نتایج حاصل در جدول (۵) نشان داده شده است. بر اساس اطلاعات این جدول فرسایش کم تا متوسط درصد بسیار کمی از رودخانه گرمی‌چای را شامل می‌شود که عمدتاً در بخش قبل از سد که فرسایش‌پذیری تشکیلات زمین‌شناسی در آن کم است واقع شده است و فرسایش متوسط ۲۳ درصد رودخانه را شامل می‌شود. نکته مهم در جدول این است که فرسایش متوسط تا زیاد ۴۳ درصد و فرسایش زیاد ۲۷ درصد مسیر رودخانه را شامل می‌شود. این واقعیت نشان‌دهنده این است که میزان فرسایش در رودخانه گرمی‌چای به دلیل وجود پوشش گیاهی کم و گسترش تشکیلات کواترنری حساس به فرسایش، زیاد است و مقابله جدی و فوری در این زمینه را می‌طلبد. فرسایش‌های زیاد و متوسط در نواحی دشتی و بخصوص در نواحی‌ای که پوشش گیاهی را کشاورزان قطع کرده و به جای آن مزارع کشاورزی احداث کرده‌اند، زیاد دیده می‌شود. در این نواحی به دلیل عدم توجه به ویژگی‌های اصولی کشت میزان فرسایش نسبتاً زیاد است.

جدول (۵) درصد طول آبراهه تحت تأثیر میزان فرسایش در رودخانه گرمی چای

نام رودخانه	کم	کم تا متوسط	متوسط	متوسط تا زیاد	زیاد
گرمی‌چای	۴	۳	۲۳	۴۳	۲۷

میزان فرسایش پذیری کل رودخانه نیز به صورت زیر به دست آمد.

$$T = (4 \times 1) + (3 \times 2) + (23 \times 3) + (43 \times 4) + (27 \times 5) = 346 \quad (5) \text{ رابطه}$$

که در این رابطه، T فرسایش پذیری کل رودخانه است.

امتیاز فرسایش پذیری کل رودخانه ۳۴۶ به دست آمد. بدیهی است که بررسی میزان فرسایش پذیری رودخانه و امتیاز کلی نشان دهنده این است که میزان فرسایش پذیری رودخانه حالت زیاد و بحرانی دارد.

نتیجه گیری

نتایج تحقیق نشان می دهد که متوسط طول موج و شعاع حلقه ها در بخش بعد از سد بسیار بیشتر از بخش قبل از سد است و این دو بخش از این لحاظ دارای اختلاف چشمگیری هستند. الگوی رودخانه در هر دو بخش، الگوی متاندری است و میزان خمیدگی در بخش بعد از سد بیشتر از بازه قبل از سد می باشد. در بخش قبل از سد میزان توسعه پیچان رودی به شکل پیچان رود توسعه یافته و یا در حال توسعه است. ولی در بخش بعد از سد، میزان توسعه پیچان رودی به شکل پیچان رود توسعه یافته و یا توسعه نیافته می باشد. بررسی نیمرخ طولی رودخانه در هر دو بخش نشان می دهد که رودخانه تقریباً دارای نیمرخ مقعر است و شیب از بالادست به طرف پایین دست کاهش می یابد. نیمرخ کاوگانه حالت ویژه رودخانه هایی است که نیروهای بازدارنده آنها به حالت تعادل رسیده است. نتایج بررسی فرسایش پذیر نشان داد که مناطق فرسایش پذیری متوسط تا زیاد و زیاد عمدتاً منطبق بر مناطقی است که دارای تشکیلات حساس به فرسایش (عمدتاً رسوب های کواترنری)، عدم وجود پوشش گیاهی مناسب و متراکم، مناطق منطبق بر تصرف حریم بستر رودخانه و انجام ساخت و ساز (عمدتاً سدسازی) بر روی آن و مناطق وقوع توسعه اراضی کشاورزی در حاشیه رودخانه ها و دارای شیب تند دیواره های مشرف به رودخانه می باشند و این امر باعث ایجاد حرکات دامنه ای به بستر رودخانه می شود. درصد طول آبراهه تحت تأثیر میزان فرسایش در گرمی چای زیاد است و بیشترین فراوانی مربوط به دسته کیفی متوسط تا زیاد و زیاد می باشد.

همان طوری که نتایج محققان دیگر نیز نشان می دهد با ایجاد سد در حوضه های رودخانه و ایجاد تغییرات شدید در زمین های اطراف سدها، و بهره برداری از منابع بستر و اطراف رودخانه برداشت (سنگ، شن، ماسه و رس) به علت از بین رفتن مقاومت ذرات، میزان فرسایش کناری در محدوده های اطراف سدسازی شدیداً افزایش پیدا می کند و میزان رسوب منتقل شونده به جریان رودخانه افزایش پیدا می کند و موجب از بین رفتن تعادل رسوبی رودخانه می شود و چون جریان رودخانه ای قادر به حمل همه رسوب های موجود نیست، رسوب گذاری در بخش های مختلف رودخانه با توجه به مورفولوژی و شیب بستر رودخانه اجتناب ناپذیر

می‌شود. رسوب‌گذاری در بستر رودخانه باعث تغییر الگوی رودخانه می‌شود و الگوهای جدید را با توجه به مورفولوژی منطقه (شکل‌گیری‌های جدید یا از بین رفتن‌ها در مسیر، شکل‌گیری‌های چند و یا ایجاد نیمکت‌های شنی در بخش‌های مختلف مسیر) شکل می‌دهد.

این تحقیق در پی آن بود که شکل‌گیری الگوهای مختلف رودخانه‌ای را با توجه به فرسایش‌پذیری مسیر رودخانه تحلیل بکند به این دلیل که فرایندهای مربوط به رودخانه نقش و عواملی مانند دبی و رسوب، از عوامل عمده‌ای در شکل‌گیری الگوی رودخانه‌ای می‌باشند اما تغییراتی که انسان‌ها در حوضه‌ها و مسیر رودخانه ایجاد می‌کنند، موجب می‌شود که تفسیر شکل‌گیری طبیعی این حالت در شبکه‌های رودخانه‌ای بسیار مشکل گردد. به این دلیل که تغییراتی خارج از شرایط طبیعی در حوضه‌ها و مسیر رودخانه اتفاق می‌افتد که مدلیزه کردن رفتار رودخانه با استفاده از روش‌ها و مدل‌های کمی بسیار سخت می‌شود و گاهی نتایجی متناقض و یا غیرواقعی نشان می‌دهد.



منابع

- احمدیان یزدی، محمدجواد (۱۳۸۰)، بررسی نقش پوشش گیاهی در کنترل فرسایش کناری پیچانورد تنجن ± هریرود، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
- اصغری، صیاد (۱۳۹۱)، بررسی روند تغییرات تکاملی رودخانه قزل اوزن با استفاده از مدل های فلوویال (محدوده بین ۳۰ کیلومتری شهرستان میانه تا مرز سیاسی استان زنجان)، رساله دکتری جغرافیایی طبیعی، گرایش ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تبریز.
- بیاتی خطیبی، مریم؛ حیدرزادگان، پروین (۱۳۸۴)، تعیین مراحل تحول ژئومورفولوژیکی دره های نواحی کوهستانی با روش‌های کلاسیک و ریاضی، مطالعه موردی: یازده حوضه و دره اصلی توده کوهستانی سهند، مجله جغرافیا و توسعه، شماره ۵، صص ۸۵-۱۱۰.
- حافظی مقدس، ناصر؛ سلوکی، حمیدرضا؛ جلیلود، رضا؛ رهنماد، جعفر (۱۳۹۱) مطالعه ژئومورفولوژی مهندسی رودخانه سیستان، فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی، شماره ۱، صص ۱۸-۱.
- رضایی مقدم، محمدحسین؛ ثروتی، محمدرضا؛ اصغری سراسکانرود، صیاد (۱۳۹۱)، تحلیل وضعیت پایداری مجرای رودخانه قزل‌اوزن با استفاده از روش‌های تنش برشی، شاخص مقاومت نسبی بستر و مطالعات صحرایی، پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۱، صص ۲۳-۴۶.
- رضایی مقدم، محمدحسین؛ محمدی‌فر، عادل؛ خلیل ولیزاده، کامران (۱۳۹۱)، آشکارسازی تغییرات کناری و شناسایی مناطق خطر رودخانه آجی‌چای در محدوده خواجه تا ونیار، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، شماره ۴، صص ۲۰-۱.
- روستایی، شهرام؛ نیری، هادی (۱۳۹۰)، تحلیل کمی تأثیر لیتولوژی و تکتونیک بر پروفیل طولی رودخانه در حوضه آبریز رودخانه مهاباد، جغرافیا و توسعه، شماره ۲۴، صص ۱۵۳-۱۳۷.
- رسولی، علی‌اکبر (۱۳۸۷)، مبانی سنجش از دور کاربردی با تأکید بر پردازش تصاویر ماهواره‌ای، انتشارات دانشگاه تبریز، چاپ اول، ۷۸۰ صفحه.
- ساسانی، فاطمه؛ افضل‌ی مهر، حسین؛ حیدرپور، منوچهر (۱۳۸۴)، بررسی تأثیر فاکتور تنش برشی بر تغییر مکان‌های جانبی در طول بازه‌های قوس‌دار در یک رودخانه درشت دانه، پنجمین کنفرانس هیدرولیک ایران، ۱۷ لغایت ۱۹ آبان ۱۳۸۴، دانشگاه شهید باهنر کرمان صص ۵۷۰-۵۶۳.
- غفاری، گلایه؛ سلیمانی، کریم؛ مساعدی، ابوالفضل (۱۳۸۵)، بررسی تغییرات مورفولوژی کناری آبراهه با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (بابلرود مازندران)، پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۵۷، صص ۷۱-۶۱.

- فیض‌نیا، سادات (۱۳۷۴)، مقاومت سنگ‌ها در مقابل فرسایش در اقالیم مختلف ایران، مجله منابع طبیعی ایران، شماره ۴۷، صص ۹۵-۱۱۶.
- کرمی، فریبا (۱۳۸۶)، عوامل موثر در فرسایش کناره‌ای رودخانه (نمونه موردی: حوضه زهکشی سعیدآبادچای)، فضای جغرافیایی، شماره ۱۸، صص ۱۷۸-۱۵۹.
- مددی، عقیل؛ رضایی مقدم، محمد حسین؛ رجائی، عبدالحمید (۱۳۸۳)، پژوهشی در تکامل ژئومورفولوژی دریاچه نئور (شمال غرب ایران - منطقه اردبیل)، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، شماره ۶۱۸، صص ۴۴-۲۱.
- مقصودی، مهران؛ شرفی، سیامک؛ مقامی، یاسر (۱۳۸۹)، روند تغییرات مورفولوژیکی رودخانه خرم‌آباد با استفاده از **Auto Cad و GIS .RS**، فصلنامه مدرس علوم انسانی، شماره ۶۸، صص ۲۹۴-۲۷۵.
- نوحه‌گر، احمد؛ یمانی، مجتبی (۱۳۸۲)، بررسی وضعیت ژئومورفولوژیکی پیچان رود و نقش آن در فرسایش بستر و کناره‌های رودخانه میناب (پایین دست میناب)، پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۵۱، صص ۸۵-۶۵.
- Afzalimehr, H., Dey, S., (2009), **Influence of bank vegetation and gravel bed on velocity and Reynolds stress distributions**. International Journal of Sediment Research, (24): pp 236-246.
- Belmont, P., Gran, K.B., Schottler, S.P., Wilcock, P.R., Day, S.S., Jennings, C., Lauer, J.W. Viparelli, E., Willenbring, J.K., Engstrom, D.R., Parker, G., (2011), **Large shift in source of fine sediment in the Upper Mississippi River**. Environmental Science and Technology, 45: pp 8804-8810.
- Bertrand, F., papanicolaou, A.N., (2009), **Effects of freezing and thawing process on bank stability**. World Environmental and Water Resources Congress. Great Rivers, pp 6480-6488.
- Comiti, F., Da Canal, M., Surian, N., Mao, L., Picco, L., Lenzi, M.A., (2011), **Channel adjustments and vegetation cover dynamics in a large gravel bed river over the last 200 years**, Geomorphology, 125 (1): pp 147- 159.
- Darby, S.E., Thorne, C.R., (1996), **Development and testing of river bank-Stability analysis**. Journal Of Hydraulic Engineering, 122(8): pp 443-454.
- Day, S.S., Gran, K.B., Belmont, P., Wawrzyniec, T., (2013), **Measuring bluff erosion part 2: pairing aerial photographs and terrestrial laser scanning to create a watershed scale sediment budget**. Earth Surface Processes and Landforms. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.3359>.
- Kessler, A.C., Satish, C., Melinda, K., (2013), **Assessment of river bank erosion in Southern Minnesota rivers post European settlement**, Geomorphology (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.07.006>.
- Kessler, A.C., Gupta, S.C., Dolliver, H.A.S., Thoma, D.P., (2012), **Lidar quantification of bank erosion in Blue Earth County, Minnesota**. Journal of Environmental Quality, 41: pp 197-207.

- Minghui, YU., Hongyan, WEI., Yanjie, L., Chunyan, H.U., (2010), **Study on the stability of non-cohesive river bank**, International Journal of Sediment Research, 25, (4): pp 391–398.
- Thorne, C.R., Tovey, N.K., (1981), **Stability of composite river banks**. Earth Surface Processes and Landforms, 6(5): pp 469-484.
- Tiron, L.J., (2009), **Flow and sediment process in a cutoff meander of the Danube delta during Episodic flooding**, Geomorphology, 106 (3-4): pp 186-197.
- Tokaldany, E.A., Darby S.E., Tosswell, P., (2007), **Coupling bank stability and bed deformation models to predict equilibrium bed topography in river bends**, Journal of Hydraulic Engineering, 133(10): pp 1167-1170.
- Wolman, M.G., (1967), **A cycle of Sedimentation and erosion in urban river channels**. Geografiska Annaler, 49: pp 385-395.

